

用于强激光等离子体超热电子温度诊断的电子堆栈谱仪的设计及刻度

薄楠^{1,2}, 田宝贤², 王浩然^{3,4}, 王乃彦^{2,*}

- (1. 北京师范大学物理与天文学院 射线束技术教育部重点实验室, 北京 100875;
2. 中国原子能科学研究院核物理研究所, 北京 102413;
3. 同方威视技术股份有限公司, 北京 100085;
4. 清华大学工程物理系, 北京 100084)

摘要: 为准确测量强激光与固体靶相互作用产生的等离子体电子温度, 本文提出一种基于电子堆栈谱仪的诊断方法。由于强激光与物质相互作用过程伴随着强电磁脉冲和高通量辐射, 传统电子学测量手段易受干扰而无法正常工作, 为此设计并搭建了一套基于富士公司成像板 (image plate, 简称 IP 板) 的电子堆栈谱仪。利用电子加速器出射的单能电子源对谱仪进行了实验刻度, 并结合 Geant4 蒙特卡罗模拟方法完成了 0.2~4.0 MeV 范围内谱仪响应矩阵的计算与验证。实验结果与模拟计算表现出良好的一致性, 验证了响应矩阵的准确性和可靠性。此外, 还实验确定了 BAS-SR 型 IP 板电子每沉积单位 MeV 能量时放出 (0.379 ± 0.035) PSL (photostimulated luminescence, 光激流明), 即对电子沉积能量的响应系数为 (0.379 ± 0.035) PSL/MeV。响应矩阵的实验刻度为电子堆栈谱仪对强激光等离子体超热电子温度诊断奠定必要的基础准备。

关键词: 相对论性强激光; 堆栈谱仪; 超热电子; 成像板

中图分类号: TL65; O4-33; O536

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2025)04-0934-12

doi: 10.7538/yzk.2024.youxian.0357

Design and Calibration of Electron Stack Spectrometer for Diagnosing Hot Electron Temperature in Intense Laser-plasma Interactions

BO Nan^{1,2}, TIAN Baoxian², WANG Haoran^{3,4}, WANG Naiyan^{2,*}

- (1. Key Laboratory of Beam Technology of Ministry of Education, College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
2. Department of Nuclear Physics, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;
3. Nuctech Company Limited, Beijing 100085, China;
4. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The interaction of relativistic intense lasers with matter generates complex plasma environments characterized by extreme conditions, such as high temperatures and densities, which are critical to fields like laser-driven inertial confinement fusion (ICF), high-energy-density physics, and strong-field physics. Accurate diagnosis of the hot electron temperature within these plasmas is essential

收稿日期: 2024-04-23; 修回日期: 2025-04-08

基金项目: 中核集团院士基金; 国家自然科学基金(1220051312); 中核集团“青年英才”启明星项目(18FY010270724294)

* 通信作者: 王乃彦

for understanding energy coupling mechanisms and the spatiotemporal evolution of the plasma. However, the intense electromagnetic pulses (EMPs) and high-flux radiation produced during these interactions pose significant challenges to conventional electronic measurement techniques, often leading to signal saturation or interference. To address these issues, this study introduces the design, construction, and calibration of a passive electron stack spectrometer based on image plate (IP), specifically tailored for diagnosing hot electron temperatures in laser-plasma interactions. The electron stack spectrometer leverages the advantages of IP, including high radiation sensitivity, a wide dynamic range, and reusability, making it suitable for environments with strong EMPs. The spectrometer consists of multiple layers of low-Z absorption materials (e.g., aluminum, titanium, and graphite) interleaved with BAS-SR-type IPs, chosen for their enhanced sensitivity to electrons over gamma rays. The design covers an energy range of 0.2 to 4.0 MeV, aligning with the expected electron energies produced by laser intensities of 10^{18} to 10^{20} W/cm². A collimator and shielding ensure precise measurements by minimizing scattered radiation, and the modular structure allows for accurate alignment with the laser target. Calibration was performed using a monoenergetic electron beam from a 2 MeV radiofrequency superconducting accelerator at Peking University. The experimental setup included a beryllium window for vacuum isolation, an electromagnet that measures the energy of electron beam and a Faraday cup to measure beam charge, with a plastic scintillator detector cross-referencing the electron flux incident on the spectrometer. The response matrix, which characterizes the signal-depth distribution for monoenergetic electrons, was experimentally determined at 1.21 MeV and 1.66 MeV. These measurements were complemented by Geant4 Monte Carlo simulations to extend the response matrix across the full 0.2 to 4.0 MeV range with a 0.2 MeV step. The simulations accounted for electromagnetic interactions, including multiple scattering, ionization, and bremsstrahlung, and were validated against experimental data, showing good agreement. A key outcome of this work is the determination of the BAS-SR IP plate energy deposition response coefficient for electrons, measured as α_e (PSL/MeV), using a ⁶⁰Co source with varying titanium absorber thicknesses. Unlike prior studies that assumed identical response coefficients for electrons and gamma rays, this work highlights potential differences in coefficients. The experimental and simulated response matrices exhibited consistent signal-depth profiles, with low-energy electrons (< 0.8 MeV) showing a monotonic signal decrease with depth, while higher-energy electrons produced a peak signal at deeper layers due to secondary electron generation. The spectrometer's upper detection limit was confirmed to be approximately 4.0 MeV, beyond which energy resolution diminishes. The calibrated response matrix enables reliable reconstruction of electron energy spectra in laser-plasma experiments, providing a robust tool for diagnosing hot electron temperatures. The spectrometer's passive, offline measurement approach eliminates the need for electromagnetic shielding, making it highly adaptable to extreme radiation environments. This work lays a critical foundation for future applications in laser-plasma diagnostics, with potential impacts on advancing ICF, high-energy physics, and related technologies. The combination of experimental calibration and simulation ensures the spectrometer's accuracy and versatility, offering a valuable resource for researchers studying relativistic laser-matter interactions.

Key words: relativistic intense laser; stack spectrometer; hot electron; IP plate

相对论性强激光与物质相互作用是激光等离子体物理、强场物理和惯性约束聚变(ICF)研究中非常重要的研究内容之一。它通常是一个多物理多尺度的过程,期间会产生非常复杂且极端的

物态环境,如何准确测量并理解其内在的动力学过程对推进激光惯性约束聚变、高能量密度物理等前沿技术和学科发展具有深远意义。但强激光与物质相互作用过程中往往会伴随着强电磁脉冲和强流辐射源的问题,常规的电子学测量方法无法在如此极端的环境下工作。为了克服其中的强电磁脉冲干扰和信号堆积饱和的问题,使用被动、存储式的离线测量工具是可行的方法之一。这其中富士(FUJIFILM)公司生产的成像板(image plate,简称IP板)因其优秀的辐射灵敏度、高动态范围以及可重复使用的优点广泛应用于这一领域。

在当前激光强度($10^{18} \sim 10^{22} \text{ W/cm}^2$)下,电子作为强激光与物质或等离子体相互作用的主要对象,起着承前启后的作用。激光能量先转换为电子能量后,再由电子向等离子体或其他成分输运能量。所以,对激光等离子体内电子温度的诊断是理解激光等离子体能量耦合过程以及等离子体时空演化行为的关键一步。

1991年,美国圣迪亚国家实验室的Carlson等^[1]使用3种微分吸收谱仪测量了高强度脉冲X射线源的能谱。1999年,德国国家计量研究院(PTB)的Behrens等^[2-3]设计并使用基于热释光片(TLD)的堆栈谱仪,同样测量了高流强下的X射线源。2004年,四川大学的陈豪^[4]以TLD为探测介质,设计了可用于诊断100 keV以上硬X射线的堆栈谱仪。2008年,美国麻省理工学院(MIT)的Chen等^[5]在 γ 堆栈谱仪前集成了一个电子磁谱仪,用于偏转电子束,实现了电子谱和 γ 谱的同时测量,其中的探测介质为IP板。2013年,法国科学家Courtois等^[6]展示了超短超强激光驱动的MeV γ 源在宽能量范围内的能谱测量和对高面密度目标物成像的能力,其中对 γ 源的测量使用的也是 γ 堆栈谱仪。2014年,美国莱斯大学的Henderson等^[7]介绍了利用拍瓦级激光对1~50 MeV γ 射线的能谱测量。2015年,德国重离子研究中心(GSI)的Horst等^[8]基于10层TLD的堆栈谱仪成功实现了宽能量范围内的光谱测量,同时在超短超强激光实验中的应用验证了其可靠性和实用性。2016年,美国罗切斯特大学的Solodov等^[9]使用基于IP板的堆栈谱仪通过测量热电子的X射线回推得到了热电子温度。2017年,中国工程物理

研究院的于明海等^[10-11]进一步发展了Chen的设计,制作了可以覆盖0.01~3 MeV的X/ γ 堆栈谱仪,并在中国工程物理研究院的星光III激光装置上进行了验证。2022年,清华大学的宋鸿鹄等在堆栈设计和优化中做了多种尝试^[12-13],希望可以用电闪体代替IP板或者TLD等介质,实现堆栈数据的在线获取,并做了相关原理性研究^[14]。从堆栈谱仪的发展和应用中可以看到,其最大的优点是克服了强流脉冲辐射场中信号堆积堵塞问题,因为它的探测机制不存在时间分辨或者说时间响应这一概念。另外,堆栈谱仪在数据采集过程中不涉及电信号,所以不存在电磁干扰的问题,可以在极端强电磁环境下稳定工作,这也是堆栈谱仪在相对论性强激光实验中广泛应用的关键点,没有电磁屏蔽的需要。

但上述研究中的堆栈谱仪,均是以对X/ γ 射线的解析为主,且其核心响应矩阵主要是通过计算机模拟计算得出,并通过间接的方式对其合理性进行验证,或者根本就没有验证。有别于上述研究,本工作堆栈谱仪的设计则瞄准激光等离子体超热电子的直接测量,然后在后期数据处理过程中排除掉可能的X/ γ 等本底信号。并由电子加速器出射的单能电子源直接对其响应矩阵进行实验测量和标定,在此基础上再结合Geant4蒙特卡罗方法对响应矩阵进行能量拓展和补充完整。为后续电子堆栈谱仪在强激光等离子体诊断中的应用奠定必要准备。另外,参考Bonnet等^[15]的方法,通过放射源辐照IP板,同时在它们之间插入不同厚度吸收片的方法,确定BAS-SR型IP板对电子沉积能量的响应系数 α_e 。本文首先介绍电子堆栈谱仪的结构设计和工作原理,以及基于电子加速器的实验刻度方法,并讨论分析实验结果;然后基于实验结果进行实验和模拟计算的相互校验,对Geant4蒙特卡罗计算程序的可靠性进行验证,最后得到电子堆栈谱仪在0.2~4.0 MeV完整的响应矩阵。电子堆栈谱仪的响应矩阵是后续在强激光等离子体中开展诊断实验所需的必要基础。

1 电子堆栈谱仪的设计及其原理

堆栈谱仪典型的结构包括3部分:吸收材料(滤片)、探测介质、屏蔽与准直装置。吸收材料依据目标辐射源的种类及其能量段的相互作用特

性等进行选择。出于对激光等离子体中(超)热电子诊断目的,选用低 Z 的铝、钛和石墨材料作为吸收片。考虑到波长 $1\ \mu\text{m}$ 、强度 $10^{20}\ \text{W}/\text{cm}^2$ 相对论性强激光与固体靶相互作用,有质动力对电子做功约为 $4\ \text{MeV}$,而 $1\times 10^{18}\ \text{W}/\text{cm}^2$ 下有质动力做功约为 $0.1\ \text{MeV}$,所以电子堆栈谱仪探测范围设计在 $0.1\sim 4\ \text{MeV}$,为此吸收滤片的厚度需要尽可能做到对这一能段电子有较好的区分和探测能力。经过预估和实践尝试,最终选择表1所列吸收材料来配合IP板构建超热电子堆栈谱仪。探测介质则选用BAS-SR型IP板,因为相比于BAS-MS和BAS-TR型,SR型对电子更为敏感。为减少散射辐射干扰,并确保入射粒子以垂直于堆栈前表面的角度入射,四周采用聚乙烯做外壳保护,前表面则添加 $\phi 5\ \text{mm}\times 10\ \text{cm}$ 的聚乙烯准直孔,以提供足够的高径比,同时低 Z 的塑料准直器可以避免电子韧致辐射所造成的不均匀本底,提高测量精度。电子堆栈谱仪整体的设计结构如图1所示,吸收片和IP板的长宽均为 $2\ \text{cm}$,整体放置在由聚

乙烯塑料切割而成的特定载具内,并通过卡槽固定在底座上,堆栈前方是由聚乙烯制做的准直器。将堆栈载具从底座上取下后,可以固定安装激光笔,用于瞄准靶点。

与磁谱仪通过磁场来进行能量鉴别不同,堆栈谱仪则是通过射程或者透射系数来进行能量区分。利用不同材料对入射粒子吸收特性的不同,通过多层吸收片逐步选择、衰减、吸收来实现辐射场中不同能量段粒子的分离。每层探测介质记录了入射粒子在对应吸收层后的信号量,利用多层介质便可以记录信号量随深度的变化,这个变化反映了入射粒子的能量特性。简言之,经过衰减后的粒子信息被探测介质(如IP板、TLD、RCF等)捕获,从而形成“信号量-深度”分布。利用这个分布曲线可以重建入射辐射场的能谱。其工作原理如式(1)所示。

$$D_i = \sum_j^N R_{ij}\phi_j \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (1)$$

其中: D_i 为第 i 层探测介质上的总信号量; k 为总探测介质层数; ϕ_j 为入射堆栈前表面辐射场中第 j 个能段上的粒子数; R_{ij} 为堆栈谱仪最核心的响应矩阵元。 R_{ij} 的物理意义是能量处于第 j 个能段上的1个入射粒子,当垂直入射堆栈前表面时会在第 i 层探测介质上留下的信号量。所以,表征单能量粒子在堆栈中的“信号量-深度”特征曲线是至关重要的,它对应响应矩阵中的1个列向量,是堆栈谱仪后期对未知辐射场能谱重建的基础,而确定它的过程就是刻度、定标堆栈的过程。

2 基于电子加速器单能源的刻度方法

实验在北京大学射频超导加速器实验室进行,利用其 $2\ \text{MeV}$ 超导光阴极电子枪^[16]所出射的束线来定标电子堆栈谱仪的响应矩阵。实验装置如图2所示。

因为超导加速腔需要在液氮温度和超高真空条件下工作,出于对加速器的保护和提高实验效率的考虑,在电子束线和真空靶室之间用 $200\ \mu\text{m}$ 铍窗做了真空隔离,铍窗前电子束线为超高真空(低于 $10^{-6}\ \text{Pa}$),铍窗后靶室为 $10^{-4}\ \text{Pa}$ 的高真空环境。实验过程中,束流在进入靶室前会对其能量、电荷量以及束斑大小进行测量。能量通过铍窗前电磁铁偏转 90° 的方式测量,由CCD相机观

表1 电子堆栈谱仪结构排列

Table 1 Structure arrangement of electron stack spectrometer

序号	材料(厚度)	序号	材料(厚度)
1	0号IP板	12	钛膜($40\ \mu\text{m}$)
2	铝膜($10\ \mu\text{m}$)	13	6号IP板
3	1号IP板	14	石墨片($300\ \mu\text{m}$)
4	铝膜($20\ \mu\text{m}$)	15	7号IP板
5	2号IP板	16	石墨片($500\ \mu\text{m}$)
6	钛膜($10\ \mu\text{m}$)	17	8号IP板
7	3号IP板	18	石墨片($800\ \mu\text{m}$)
8	钛膜($20\ \mu\text{m}$)	19	9号IP板
9	4号IP板	20	石墨片($1000\ \mu\text{m}$)
10	钛膜($30\ \mu\text{m}$)	21	10号IP板
11	5号IP板	22	聚乙烯压板($2\ \text{cm}$)

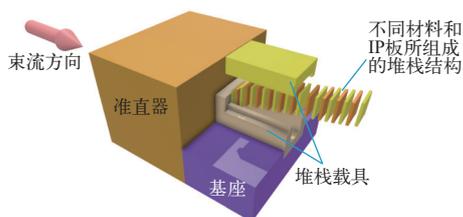
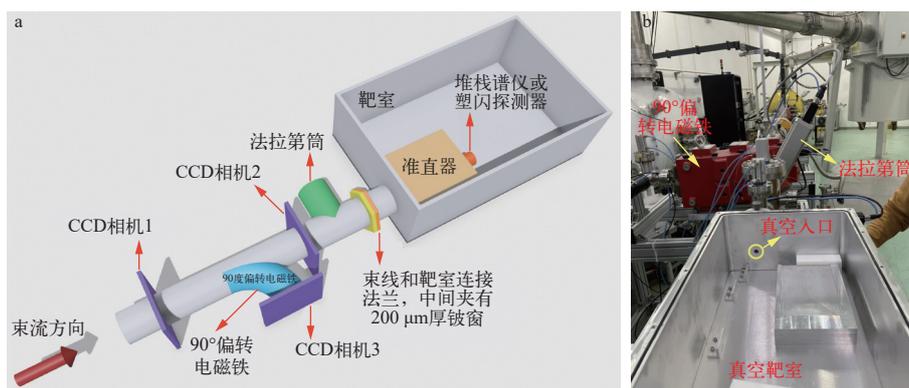


图1 电子堆栈谱仪结构

Fig. 1 Electron stack spectrometer structure



a——超导光阴极电子枪束线末端的结构; b——束线末端真空靶室实物图

图2 电子堆栈谱仪刻度实验加速器束线布局

Fig. 2 Beamline layout for calibration experiment of electron stack spectrometer in accelerator

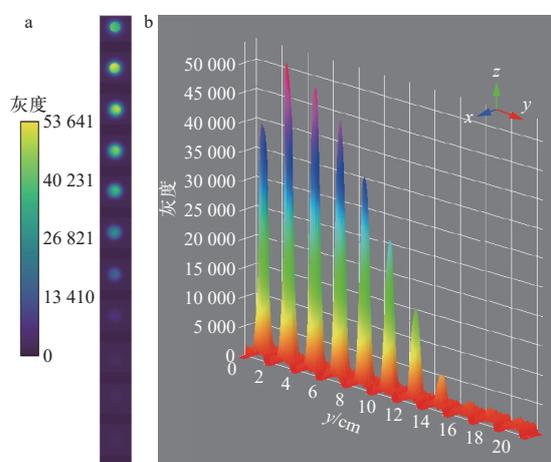
测被偏转电子的荧光信号; 电荷量则通过放置在束线侧延拓的法拉第筒测量, 测量时法拉第筒伸到束线中心位置处, 完成后再降至侧边; 通过沿线两个 CCD 相机来查看束流聚焦情况, 以此作为铍窗前束斑大小的判断依据。电子束流穿过铍窗后进入靶室, 再经过 $\phi 5 \text{ mm} \times 10 \text{ cm}$ 的准直器, 最后打在电子堆栈谱仪上。

堆栈响应矩阵表征的是单个人射粒子所造成的信号, 所以在刻度过程中需要知道正入射堆栈前表面的总电子数, 又因为铍窗的散射作用, 使得法拉第筒确定出的电荷量并不是有效入射堆栈前表面的电子数。为此, 实验过程中在保证加速器参数不变的条件下, 依次将电子堆栈谱仪和塑料闪烁体探测器交替放置在靶室准直器后方, 由塑料闪烁体探测器对穿过准直器正入射堆栈前表面的电子进行计数。

3 结果与分析

在电子加速器注入能量为 1.66 MeV 时, 法拉第筒位置处测得单发电荷量为 0.5 pC/pulse, 累计 300 个脉冲, 堆栈中从 0 号到 10 号 IP 板上原始灰度值信号分布如图 3 所示。

从图 3 可以看到, 第 0 层 IP 板灰度值并不是最高的, 反而第 1 层是最高的, 这是因为由加速器直接入射第 0 层 IP 板的是能量更高的初级电子, 它们在穿过第 0 层 IP 板时因散射、吸收而数目有所减少, 但电离产生了更多低能次级电子, 这些次级电子击中第 1 层 IP 板, 而 IP 板对这些低能次级电子更加敏感(对 100 keV 电子最为敏感, 高于和低于此值灵敏度都会下降), 所以信号反而有所升



a——BAS-SR 型 IP 板原始灰度信息;

b——原始灰度的直观展示

图3 电子加速器注入能量为 1.66 MeV 时电子堆栈的原始灰度信号

Fig. 3 Original grayscale signal of electron stack at 1.66 MeV of energy injected by electron accelerator

高; 当加速器电子继续往更深层传输时, 初级电子能量、数量减少, 电离本领降低, IP 板信号依次递减, 说明此时电子在堆栈谱仪中的散射、吸收过程相比于电离过程更占主导, 有效电子数量的下降使得 IP 板信号减少, 这与预期一致。图 3b 中高斯峰的基座是当前 IP 板层上本底信号的客观表达, 表明随着 IP 板序号的增加, 其本底信号缓慢减小, 但总体差距不大, 更重要的是第 8~10 层 IP 板上信号基本保持一致, 说明这些信号是电子韧致辐射光子的信号, 同时也表明电子在堆栈谱仪中的韧致辐射过程对信号的贡献相比于直接电子信号可以忽略不计, 这得益于电子堆栈在设计之初已尽可能使用低原子序数的材料并使用对

电子更加敏感的SR型IP板(相对于 γ),以此尽可能排除混合辐射场中 γ 信号的影响。

扫描IP板是在辐照结束后的83 min时刻进行的,而扫描直接输出灰度值代表的是IP板被扫描时刻仍剩余存在其中的信息量,并不是辐射源辐照时刻的信号。对每层IP板就自身本底信号进行扣除后,根据文献[17]可知,在室温(20±1)℃下SR型IP板信号自发衰减行为具有 $f(t[\text{min}])=0.38\exp(-t/9.36)+0.71\exp(-t/5\,990.67)$ 的双e指数形式。对灰度值进行e指数衰减修正,得到辐照结束 $t=0$ 时刻的灰度值信号。但因为灰度值是计算机编码值,并不是直接的物理量,没有直接的物理意义,为此,需要把灰度值转换为更具物理意义的PSL信息。转换关系由扫描器生成图片时的编码过程决定,本文使用GE Typhoon FLA 7000扫描器输出的gel格式图片,采用平方根编码^[18-19],其对应的转换关系如下:

$$\text{PSL} = \left(\frac{G}{2^{16}-1} \right)^2 \left(\frac{R_{\mu\text{m}}}{100} \right)^2 h(V) 10^{L/2} \quad (2)$$

其中: $R_{\mu\text{m}}=50\ \mu\text{m}$ 为扫描分辨率; $L=5$ 为动态范围; $V=800\ \text{V}$ 为光电倍增管电压; $h(V)$ 为灵敏度函数。文献[17]得出,扫描器灵敏度函数 $h(V=800\ \text{V})=0.215$,将其代入式(2)即可得到 $t=0$ 时刻对应的PSL信号值。

用塑料闪烁体探测器替换真空靶室内电子堆栈谱仪,并保持其他条件不变,以此来确定入射堆栈前表面的电子数。加速器注入能量同样设置为1.66 MeV,单发电荷量为0.5 pC/pulse,得到经本底修正后单位活时间内塑闪所获取的电子计数谱,如图4a所示。对图中1.66 MeV高斯信号峰拟合,其峰位出现在 $E=1\,514\ \text{keV}$ 位置,与铍窗前电磁铁给出的 $E=1\,660\ \text{keV}$ 相差约146 keV。而查电子截面数据表^[20]预估该加速器电子在密度为 $1.85\ \text{g/cm}^3$ 、厚度为 $200\ \mu\text{m}$ 的铍窗中能量损失约为70 keV,略小于实际能损。但总体上塑闪给出的能量与电磁铁给出的一致。对塑闪高斯信号峰下 5σ 范围积分,得 $109.497\ \text{s}^{-1}$,并经塑闪探测效率($0.007\,5\pm 0.003\,0$)修正,得到加速器电子源穿过铍窗再经准直器后到达的电子数,为 $14\,599.6\ \text{s}^{-1}$ 。但考虑到塑闪采集时和电子堆栈工作时加速器单发电荷量或累计总发射量可能不一致,所以计算从法拉第筒到靶室准直器后方电子的传输效率更为

可靠,并认为这个传输效率只与加速器能量有关。所以,加速器能量为1.66 MeV时,电子传输效率为 $(109.497/0.007\,5)/(0.5\ \text{pC/pulse}\times 1\ \text{Hz}/e_0)\approx 0.004\,68$,其中 e_0 为元电荷。利用这个效率值,可以确定堆栈谱仪工作时,在加速器能量为1.66 MeV、单发脉冲为0.5 pC/pulse时,共累计300 pulse发射量,最后成功入射堆栈前表面的电子数为 4.39×10^6 。这些电子数可以认为是均匀分配到准直孔内的每个像素上。已知准直孔径为5 mm的圆形,IP板扫描像素大小为 $R_{\mu\text{m}}=50\ \mu\text{m}$,所以像素个数为 $N_{\text{pixels}}\approx 7853$,相应地每个像素内平均入射电子数约为559.022个。最后,将堆栈谱仪内1个像素上的平均PSL信号对有效入射电子数进行归一化,得到电子堆栈谱仪1.66 MeV响应矩阵列向量的实验刻度结果,如图4b所示。

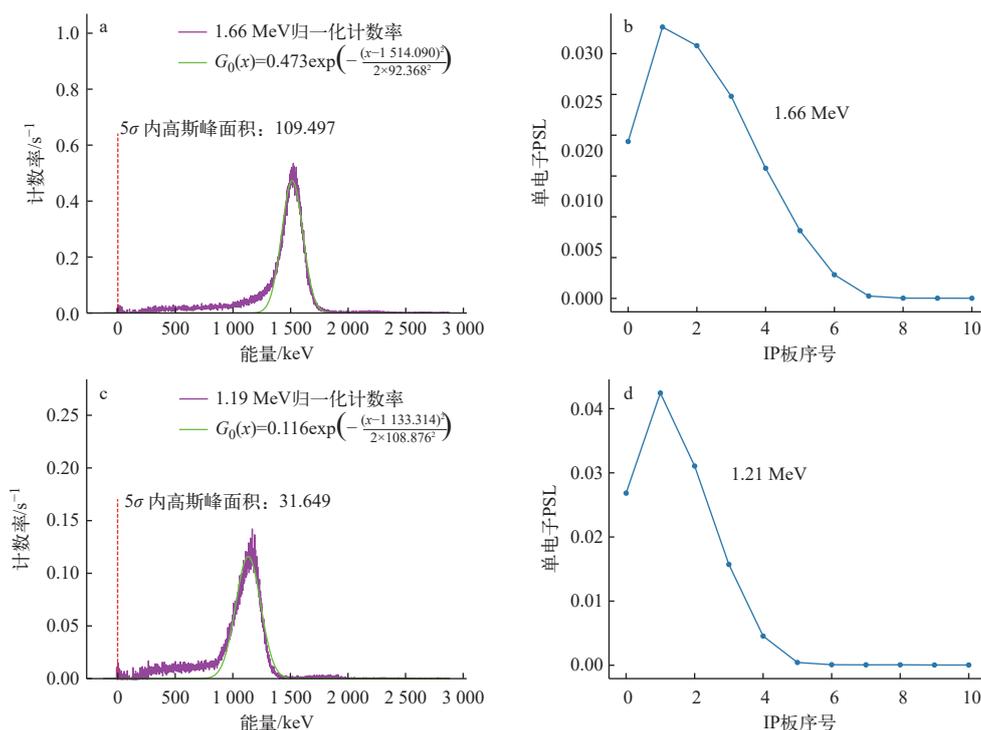
更换加速器能量为1.21 MeV,重复以上步骤完成另一组能量下堆栈响应矩阵的实验刻度,塑闪和堆栈实验结果分别如图4c、d所示。IP板扫描和读数之间的等待时间 $t=69\ \text{min}$,其他扫描参数同1.66 MeV时保持一致。但需要注意,塑闪能谱测量是在加速器1.19 MeV注入能量下完成的,与堆栈时的1.21 MeV有少许偏差。

4 堆栈响应矩阵Geant4计算和分析

堆栈响应矩阵刻画的是一系列单能源在堆栈谱仪中“信号量-深度”分布曲线。因为客观实际中无法找到如此多符合条件的单能源,所以,借助计算机强大的计算能力得到满足后续工作所需的完整响应矩阵就是重要的技术手段。通过Geant4蒙特卡罗粒子输运程序包^[21-24]来计算堆栈响应矩阵。但在正式计算前,需要通过加速器实验对计算程序的可靠性和有效性进行评估。同时因有塑料闪烁体探测器参加,所以塑闪实验能谱也可以作为模拟程序的检验标准。

以加速器沿线的法拉第筒、电磁铁和束斑CCD的客观测量为基础进行建模,电子束流的模拟起点是铍窗前,然后向铍窗后真空靶室内进行束流传输,几何建模效果图如图5所示。

电子作为模拟对象,主要考虑其参与的电磁相互作用,包括5个物理过程:多重散射(弹性散射)、库仑散射(非弹性散射)、电离(从分立能级到连续能级之间的跃迁)、激发(分立能级到分立



a, c——塑闪能谱测量系统在单位活时间内的计数谱; b, d——电子堆栈响应矩阵列向量实验刻度结果
 图4 加速器注入能量为1.21 MeV和1.66 MeV时塑闪能谱测量结果和堆栈响应矩阵列向量实验结果
 Fig. 4 Measurement results of plastic scintillator energy spectrum and column vector of stack response matrix under accelerator injection energy of 1.21 MeV and 1.66 MeV

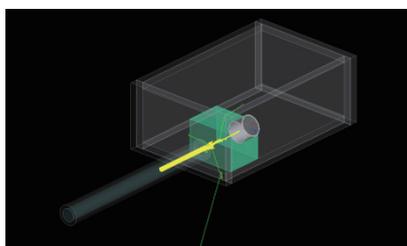


图5 Geant4蒙特卡罗几何建模效果图
 Fig. 5 Geometric modeling illustration of Geant4 Monte Carlo simulation

能级的跃迁)和韧致辐射。选用Geant4内置的G4EmLowEPPhysics模型作为电子物理过程的描述。相对来说,低能电子的精确模拟是困难的,这主要源于两方面:1)不同过程的低能实验截面数据较为匮乏;2)电子输运理论在低能端的预测能力显著下降。因此,Geant4结合实验数据、理论模型和参数化方法来模拟电磁相互作用,并提供多种预设的物理列表(Physics List),每个列表包含一组针对特定能量范围和相互作用类型优化的模型。其中,G4EmLowEPPhysics集成于该框架内,旨在提升低能电磁过程的模拟精度,其截面数据更多依赖实验测量结果。因此,本工作选用这一

物理列表来描述电磁相互作用过程。

在1.19 MeV和1.66 MeV两个能量下,模拟加速器1 s所出射电子数($0.5 \text{ pC/pulse} \times 1 \text{ Hz}/e_0 \approx 3.75 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$)在塑闪晶体内的能量沉积谱,将其乘以探测器绝对效率后与塑闪获取系统在单位活时间内的计数谱进行比较,结果如图6所示。

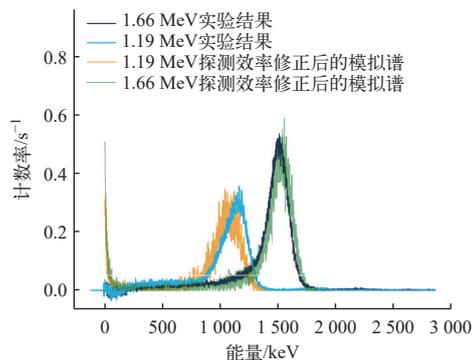


图6 塑闪能谱测量系统的实验结果和模拟结果
 Fig. 6 Experimental and simulated results of plastic scintillator energy spectrometer measurement system

从图6可以看到,实验和模拟符合得较好,但1.19 MeV实验高斯峰略有倾斜。从模拟结果可了解到,除单能电子高斯峰外,在低能段还有1个指

数衰减谱,这些电子能量很小,应该是初级电子束与聚乙烯塑料准直器相互作用产生的次级电子,它们与电子学噪声混合在一起,在当前的塑闪探测系统中无法识别,在塑闪能谱中将其一同视为本底噪声进行了扣除。这样处理是“安全”的,不会影响整个堆栈信号的分布曲线。首先,因为这些低能次级电子来源于堆栈系统内的准直器,是系统自身表现的一部分,并非外来因素,而在对电子堆栈系统刻度的过程中,这些因素理应被包含考虑在内,而无需担心。其次,因为IP板对100 keV电子最为敏感,所以这些低能次级电子对堆栈实验结果的影响只会局限在第0层IP板上,而且这个低能e指数结构中绝大部分局限在100 keV以下,其面积相对单能高斯峰面积更是很小,对电子堆栈谱仪实验结果的影响极其有限。第三,通过塑闪来确定入射堆栈前表面的有效电子数,目标本就是确定源自电子加速器的

初级电子,即高斯峰下面积,而非源自准直器的低能次级电子。堆栈响应矩阵需要归一化的对象是电子加速器的初级电子,而非准直器所产生的低能低级电子。

对塑闪能谱仿真结束后,模拟计算1.21 MeV和1.66 MeV加速器电子源在堆栈谱仪IP板灵敏层上的平均能量沉积,并经铍窗-准直器的传输效率修正后,对入射堆栈前表面的电子数归一化,得到单个像素上单个电子所对应的沉积能量分布曲线。普遍认为IP板PSL信号与其磷光层中沉积能量成正比^[15],因此,堆栈谱仪实验测量PSL曲线应与模拟计算沉积能量曲线具有相同的分布形式,将二者绘制在一起,结果如图7所示。可以看到二者分布形式基本一致,符合预期。但是,对电子堆栈谱仪的刻度任务,需要得到的是以PSL信号所表示的响应矩阵,为此,需要知道这些沉积能量会产生多少PSL。

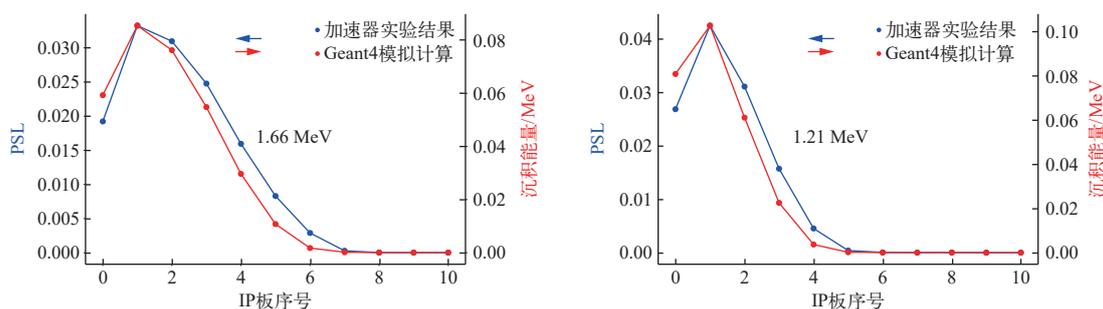


图7 单位像素内单个电子的PSL实验测量曲线与计算沉积能量分布曲线

Fig. 7 Experimental measurement curve of PSL and calculated curve of deposition energy distribution for single electron within unit pixel

参考Bonnet等^[15]的方法,先使用1个固定的放射源辐照IP板,然后在它们之间插入不同厚度的吸收片,以此来改变放射源在IP板中的有效沉积能量,得到PSL信号与沉积能量间的关系,然后拟合得出IP板的沉积能量响应系数 α (PSL/MeV),即每沉积单位能量所产生的PSL信号。但Bonnet认为,IP板对 γ 和对电子的沉积能量响应系数 α 是相等的,统一以 α_e 表示。而本工作对这一观点提出了不同的认识。所用放射源与Bonnet保持一致,为 ^{60}Co 电子源(同时也是 γ 源),如图8所示,该源是 $\phi=1\text{ mm}$ 的点源,活度为 $3.364\times 10^4\text{ Bq}$,两侧使用 $80\ \mu\text{m}$ 的塑料薄膜密封。利用其对BAS-SR型IP板(其结构组成和化学式列于表2)

进行多次辐照,室温控制在 $(20\pm 1)\text{ }^\circ\text{C}$,每次辐照3 min,避光等待60 min后扫描,每次仅改变源和IP板之间所插入Ti膜的厚度,其他辐照和扫描条件保持恒定。由实验测得不同吸收膜厚度下SR型IP板中PSL数目,并通过Geant4蒙特卡罗计算对应辐照条件下磷光层中的能量沉积。图9a为



图8 BAS-SR型IP板能量响应实验用 ^{60}Co
Fig. 8 ^{60}Co radiation source used in experiment

表 2 BAS-SR 型 IP 板的结构组成
Table 2 Structure component of BAS-SR type IP plate

层级	厚度/ μm	材料	密度/(g/cm^3)	化学式
前保护层	6	聚对苯二甲酸乙二酯(PET)	1.4	$\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4$
磷光层	120	荧光剂: 聚氨脂 = 25 : 1; Ba : F : Br : I = 1 : 1 : 0.85 : 0.15(原子数比, 密度 5.2 g/cm^3)	3.3	$\text{Ba}_{2263}\text{F}_{2263}\text{Br}_{1923}\text{I}_{339}\text{C}_{741}\text{H}_{1730}\text{N}_{247}\text{O}_{494}$
背板	10	塑料	1.4	$\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4$
基板	190	PET	1.4	$\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4$
铁磁层	80	MnO , ZnO , Fe_2O_3 , 塑料	3.0	$\text{Mn}_{1015}\text{Zn}_{885}\text{Fe}_{902}\text{C}_{1315}\text{H}_{1315}\text{O}_{4568}$
后保护层	25	PET	1.4	$\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4$

0 μm Ti 膜时 60 min 扫描所得灰度值分布, 图 9b 是对应辐照条件下 Genat4 计算 IP 板灵敏层 0 时刻的沉积能量分布。对灰度分布进行本底和衰减修正, 并转换为 PSL 信号, 以信号区内单个像素上平均 PSL 值为 y 轴, 与此同时统计单个像素上的沉积能量作为 x 轴。改变吸收膜的厚度, 所得结果如图 10 所示。

图 10 中越靠右侧的点对应磷光层中沉积能量越高, 也对应越薄的 Ti 膜吸收片, 但吸收片厚

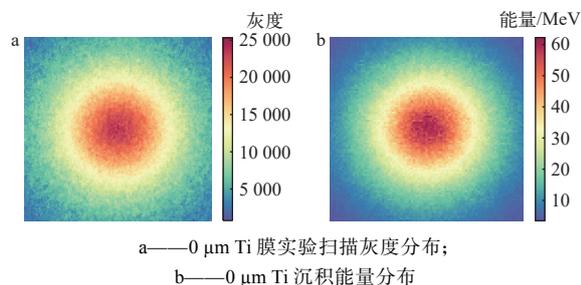


图 9 辐照结束后 60 min 扫描所得灰度分布和 Genat4 计算辐照结束 0 时刻沉积能量分布

Fig. 9 Gray-scale distribution obtained by scanning 60 min after irradiation and deposited energy distribution at the end of irradiation (0 moment) calculated by Genat4

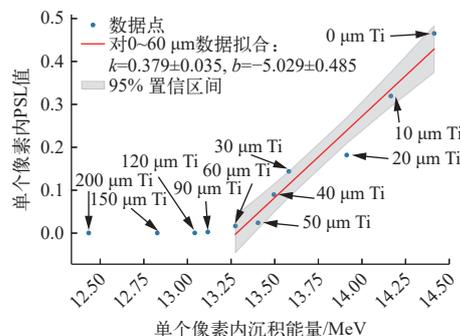


图 10 IP 板对电子沉积能量响应系数

Fig. 10 Energy response coefficient of IP plate to electron energy deposition

度达到 60 μm 后, ^{60}Co 中最大能量为 318 keV 而平均能量为 96 keV 的绝大部分电子已经被阻挡, 无法继续在 IP 板磷光层中进行能量沉积, 此时只有 ^{60}Co 源的 γ 射线穿透吸收片而作用于 IP 板上。因为 γ 射线需要先转换为电子然后再在 IP 板磷光层中沉积能量, 并且 IP 板磷光层厚度只有百微米量级, 曝光时长也仅有 3 min, 所以 γ 射线在 IP 板中留下能量的概率远小于电子, 从而使得吸收膜厚度高于 60 μm 后, PSL 信号几乎看不到差距, 近乎为 0。所以此时 γ 信号和电子信号在图中得到了分离。

对 0~60 μm 电子信号点做 $y=kx+b$ 线性拟合, 得到斜率 $k=(0.379\pm 0.035)$ $\text{PSL}/\text{MeV} \equiv \alpha_e$, 该斜率表示电子在 IP 板磷光层中每沉积 1 MeV 能量将产生 (0.379 ± 0.035) PSL, 将这一值记为 SR 型 IP 板对电子的能量响应系数 α_e 。这一结果与 Bonnet 等^[15]、Boutoux 等^[25] 和 Singh 等^[26] 的相关结果在量级上相一致(表 3)。但与 Bonnet 不同的是, 从图 10 中可以明显看到, 当膜厚度超过 60 μm 后, 由 γ 射线沉积能量所产生 PSL 的斜率与电子是不同的。而造成这一结果可能的原因有 3 个。1) 辐照时间过短, 相比于电子, γ 在 IP 板中的能量沉积效率很低, 同时因所用 ^{60}Co 源活度也很低, 3 min 辐照没

表 3 不同作者报道的 BAS-SR 型 IP 板对电子的沉积响应系数

Table 3 Energy response coefficients of BAS-SR type IP plate to electron deposition reported by different authors

作者	$\alpha_e/(\text{PSL}/\text{MeV})$
Bonnet 等 ^[15]	0.333 ± 0.080
Boutoux 等 ^[25]	$0.140\pm 0.028, 0.22\pm 0.05$
Singh 等 ^[26]	0.62

有给 γ 充足的作用时间来产生可被观测的PSL信号,造成图10中 α_e 和 α_γ 不同的“假象”。2) α_e 和 α_γ 的确是不同的,不能认为是相等关系,Bonnet的观点有待商榷。3) 计算IP板中能量沉积时建模方式、能量收集方式不同。本工作对IP板磷光层建模时,除了包含发光物质Ba:F:Br:I,还考虑了其中不发光的黏性树脂成分,是以表2所列的材料

结构和化学式对IP板建模。所以,总的沉积能量为两部分之和。因为本工作主要服务于电子, α_e 和 α_γ 之间的关系,不做深入讨论。

在得到BAS-SR型IP板对电子沉积能量的响应系数 α_e 后,将图7中Geant4计算的沉积能量响应曲线转换为对应的PSL信号曲线,结果如图11所示。

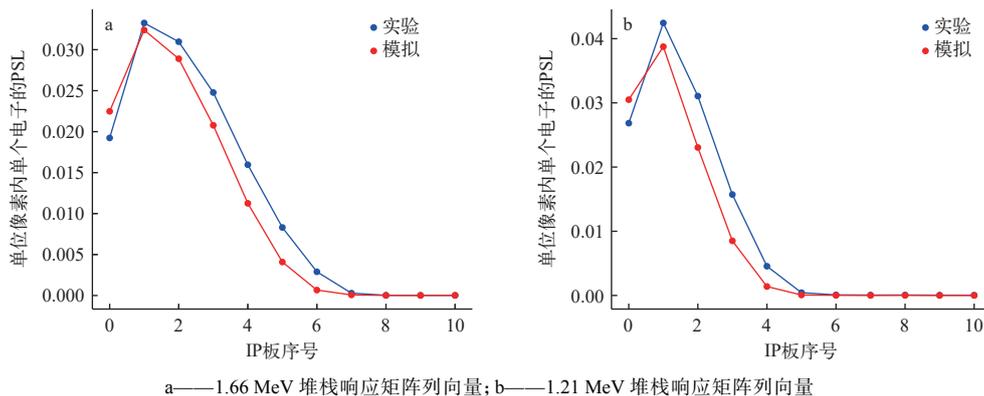


图 11 实验测量 PSL 信号与模拟计算 PSL 信号比较

Fig. 11 Comparison between experimental PSL signals and simulated PSL signals

从图11可以看到,在1.66 MeV和1.21 MeV两个能量点下堆栈谱仪模拟计算PSL信号比实验测量信号总体偏小,但二者仍具有很好的一致性,充分肯定了模拟工作在一定程度上合理性和可靠性。实验测量和模拟计算相互校验后,基于成熟的计算程序将堆栈谱仪的响应矩阵元向更宽能量范围拓展,完成电子堆栈谱仪在0.2~4.0 MeV、以0.2 MeV为步长的响应矩阵计算,结果如图12所示,其中每条分布曲线对应响应矩阵中1个列向量,整体组成1个11行20列的堆栈响应矩阵。

从图12可以看到,在0.2 MeV和0.4 MeV,低能电子几乎只能作用在第0层IP板上。能量继

续增大,开始对更深层IP板产生作用。在0.8 MeV以下,信号分布随IP板“深度”呈单调递减趋势。从0.8~1.0 MeV的某个能量点开始,初级电子在第0层IP板上电离出更多低能次级电子,这些次级电子作用在后续IP板上,从而使得第1层IP板信号大于第0层,信号分布随IP板“深度”呈现先增大再减小的趋势,并且随着能量的继续升高,信号极大所对应IP板序号也在向更深处转移。在(3.4~4.0 MeV)高能极限处,不同能量下信号分布曲线趋于一致,表明当前堆栈谱仪的设计对这一能段及以上入射粒子的分辨在变差,而且这一能段上不同序号IP板的信号分布也在趋于平缓(不同层IP上信号间差异在缩小),这些都在暗示,当前结构下的电子堆栈谱仪探测上限应在4.0 MeV左右。响应矩阵总体变化符合预期。

本工作所设计的堆栈谱仪,第0层IP板前没有任何阻挡,直接被入射电子作用,所以它的信号具有IP板对单粒子灵敏度的物理意义(PSL/电子)。图13展示了第0层IP板的单粒子灵敏度表征结果,其中Geant4计算曲线来自图12中第0号IP板的数据点,是本工作蒙特卡罗计算结果,红色圆点对应1.21 MeV和1.66 MeV加速器实验测量

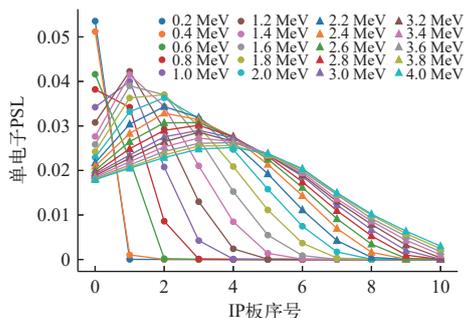


图 12 电子堆栈响应矩阵

Fig. 12 Response matrix of electron stack spectrometer

值。为便于对比分析,图中同时呈现了 Bonnet 等^[15]、Boutoux 等^[25]以及 Singh 等^[26]报道的关于 BAS-SR 型 IP 板对电子的单粒子灵敏度数据。本工作结果与参考数据呈现出相似的趋势,在高于 100 keV 后,灵敏度随能量下降,但绝对灵敏度值高于其他文献报道。这种差异源主要于实验结构的不同:电子堆栈谱仪结构中,第 0 层 IP 板后方介质会对初级入射电子、次级电离电子发生背散射作用,使得部分电子再次进入第 0 层 IP 板灵敏层,导致信号增强效应;而相关文献中的参考数据均采用单层 IP 板,透射电子发生背散射后重新进入灵敏层的概率可忽略不计。这种由实验方法差异导致的灵敏度提升符合认知预期,所以,严格意义上讲图 13 中 Geant4 计算曲线不能作为 IP 板性能的指标,但它所呈现趋势与其他作者的一致性从侧面说明本工作实验测量与理论模型具有一定的可靠性。

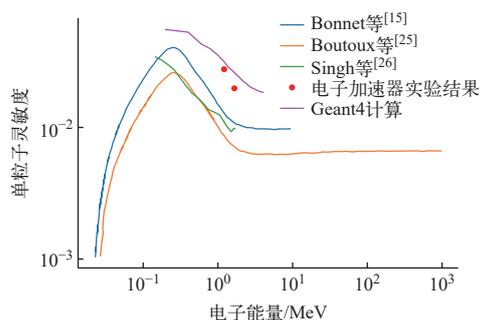


图 13 IP 板单电子灵敏度曲线

Fig. 13 Single-electron sensitivity curve of IP plate

5 总结

随着强激光技术的发展,激光功率密度已经进入相对性强度区域,而如此高强度的激光与物质相互作用过程会产生极端高温高密度的等离子体,对等离子体状态的研究是理解强激光物质相互作用理论和发展强激光技术应用的必经之路。而对这种极端物态性质的研究需要面对强电磁脉冲干扰和信号跟随、堆积饱和等问题。为此采用被动、离线、积分式的方法是可行的方案之一。

本工作设计了一款可用于强激光等离子体超热电子(0.4~4.0 MeV)温度诊断的电子堆栈谱仪,以应对强流脉冲辐射源诊断的需要。并基于电子加速器和 Geant4 蒙特卡罗计算相结合的方式对其响应矩阵完成了实验刻度和模拟计算,得到了

完整的响应矩阵。为电子堆栈谱仪在强激光上开展实验测量和解谱工作奠定基础准备。此外,确定出 BAS-SR 型 IP 板对电子沉积能量的响应系数为 $\alpha_e=(0.379\pm 0.035)$ PSL/MeV。

堆栈谱仪凭借其灵活的设计、对高通量脉冲辐射场的适应能力,以及抗电磁干扰等优点成为强流脉冲辐射场测量中的重要工具。尽管在能量分辨率方面不及电子学分析方法,但在实验刻度基础上结合先进的模拟和解谱算法,堆栈谱仪在激光惯性约束聚变、激光等离子体物理、高能物理、核医学、辐射防护和核废料处理等领域具有广泛的应用前景和重要的应用价值。

感谢北京大学物理学院射频超导实验室的黄森林老师、林林老师、贾豪彦同学提供的电子加速器实验条件,中国原子能科学研究院核技术综合研究所的徐利军、陈克胜老师所提供的放射源,中国原子能科学研究院物理所王钊、李静、胡凤鸣和武海成老师提供的暗室,以及孙伟、程浩在堆栈实验刻度工作中的建议和帮助。

参考文献:

- [1] CARLSON G, FEHL D, LORENCE L. A differential absorption spectrometer for determining flash X-ray spectra[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 1991, 62(2): 264-274.
- [2] NOLTE R, BEHRENS R, SCHNÜRER M, et al. A TLD-based few-channel spectrometer for X ray fields with high fluence rates[J]. *Radiation Protection Dosimetry*, 1999, 84(1-4): 367-370.
- [3] BEHRENS R, AMBROSI P. A TLD-based few-channel spectrometer for mixed photon, electron, and ion fields with high fluence rates[J]. *Radiation Protection Dosimetry*, 2002, 101(1-4): 73-76.
- [4] 陈豪. 飞秒激光与固体靶相互作用产生的硬 X 射线能谱测量研究[D]. 成都: 四川大学, 2004.
- [5] CHEN C D, KING J A, KEY M H, et al. A bremsstrahlung spectrometer using *k*-edge and differential filters with image plate dosimeters[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79(10): 10E305.
- [6] COURTOIS C, EDWARDS R, COMPANT L F A, et al. Characterisation of a MeV bremsstrahlung X-ray source produced from a high intensity laser for high areal density object radiography[J]. *Physics of Plasmas*, 2013, 20(8):

- 083114.
- [7] HENDERSON A, LIANG E, RILEY N, et al. Ultra-intense gamma-rays created using the Texas Petawatt Laser[J]. *High Energy Density Physics*, 2014, 12: 46-56.
- [8] HORST F, FEHRENBACHER G, RADON T, et al. A TLD-based ten channel system for the spectrometry of bremsstrahlung generated by laser-matter interaction[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2015, 782: 69-76.
- [9] SOLODOV A A, YAAKOBI B, EDGELL D H, et al. Measurements of hot-electron temperature in laser-irradiated plasmas[J]. *Physics of Plasmas*, 2016, 23(10): 102707.
- [10] 于明海, 谭放, 闫永宏, 等. 用于激光产生的高能 X 射线源能谱诊断的滤片堆栈谱仪的研制[J]. *原子能科学技术*, 2017, 51(6): 1090-1095.
- YU Minghai, TAN Fang, YAN Yonghong, et al. Development of filter stack spectrometer for spectrum measurement of X ray generated by laser[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2017, 51(6): 1090-1095(in Chinese).
- [11] 于明海. 激光聚变中硬 X 射线的光谱诊断[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- [12] SONG H, WU Z, ZHANG H, et al. A simulation optimization design of the filter stack spectrometer for laser-plasma interaction experiment[J]. *Journal of Instrumentation*, 2023, 18(3): P03012.
- [13] 宋鸿鹄, 衣宏昌, 魏朔阳, 等. 吸收法在强激光与固体靶所致脉冲 X 射线能谱测量中的研究进展[J]. *辐射防护*, 2022, 42(2): 89-101.
- SONG Honghu, YI Hongchang, WEI Shuoyang, et al. Progress of absorption method in pulsed X-ray spectra measurement generated by ultra-short ultra-intense laser-solid interaction[J]. *Radiation Protection*, 2022, 42(2): 89-101(in Chinese).
- [14] SONG H, QIU R, YI H, et al. Spectrometer for ultrashort X-ray based on scintillator and optical fiber: Proof of principle study[J]. *Journal of Instrumentation*, 2023, 18(2): P02017.
- [15] BONNET T, COMET M, DENIS-PETIT D, et al. Response functions of imaging plates to photons, electrons and ^4He particles[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(10): 103510.
- [16] 黄森林, 刘克新, 赵夔, 等. 直流-射频超导光阴极电子枪[J]. *科学通报*, 2023, 68(9): 1036-1046.
- HUANG Senlin, LIU Kexin, ZHAO Kui, et al. DC-SRF photocathode gun[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68(9): 1036-1046(in Chinese).
- [17] BO Nan, WANG Naiyan. Imaging plate scanners calibration and the attenuation behavior of imaging plate signals[J]. *Chinese Physics B*, 2024, 33(6): 060701.
- [18] TAKAMATSU M, TANAKA Y, KOBAYASHI T, et al. Development of a next-generation laser-scanner system for life science research[EB/OL]. 2016-12-14 (2024-04-06). https://asset.fujifilm.com/www/jp/files/2019-12/316051fac17a6188e6d3997041ac95b0/ff_rd062_004_en.pdf.
- [19] HEALTHCARE G. Typhoon™ fla 7000 user manual 28-9607-62 ac[M]. USA: General Electric Company, 2009.
- [20] CULLEN D, SELTZER S, PERKINS S. Tables and graphs of electron-interaction cross sections from 10 eV to 100 GeV derived from the LLNL Evaluated Electron Data Library (EEDL), Z=1-100: Number 31[R]. USA: LLNL, 1991.
- [21] Geant4 Collaboration. Geant4: A simulation toolkit[EB/OL]. 2024 [2024-04-04]. <https://geant4.web.cern.ch/>.
- [22] ALLISON J, AMAKO K, APOSTOLAKIS J, et al. Recent developments in Geant4[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2016, 835: 186-225.
- [23] ALLISON J, AMAKO K, APOSTOLAKIS J, et al. Geant4 developments and applications[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2006, 53(1): 270-278.
- [24] AGOSTINELLI S, ALLISON J, AMAKO K, et al. Geant4—A simulation toolkit[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2003, 506(3): 250-303.
- [25] BOUTOUX G, RABHI N, BATANI D, et al. Study of imaging plate detector sensitivity to 5-18 MeV electrons [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(11): 113304.
- [26] SINGH S, SLAVICEK T, HODAK R, et al. Absolute calibration of imaging plate detectors for electron kinetic energies between 150 keV and 1.75 MeV[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88(7): 075105.